

# La Física en tres paradigmas

## Francisco R. Villatoro

Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación,  
Universidad de Málaga

ME HAN PEDIDO QUE PRESENTE ALGUNOS PARADIGMAS ABIERTOS DE la Física; todo un oxímoron. Thomas S. Kuhn, doctor en Física por la Universidad de Harvard en 1949, introdujo el concepto de paradigma en 1959, cuando ya era profesor de Historia de la Ciencia en la Universidad de California en Berkeley. Un paradigma kuhniano es un problema, o una aplicación, que es ejemplar o paradigmático, cuya resolución permite que los científicos jóvenes se entrenen a la hora de atacar por su cuenta otros problemas candentes que aún están abiertos. El concepto de paradigma se popularizó gracias a su libro *La estructura de las revoluciones científicas* (1962), aunque recibió un gran número de críticas porque su definición no era rigurosa; de hecho, la prosa ligera de esta obra, que se lee como una novela, desagradó a muchos filósofos, pero la encumbró como *best seller* absoluto entre los libros de filosofía del siglo XX.

El propio Kuhn renegó de los términos «paradigma» y «revolución científica» que le hicieron famoso; ni siquiera menciona estos términos en su magna obra *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894–1912* (1978), sobre el papel de Planck en el nacimiento de la física cuántica. A pesar de ello la influencia kuhniana sobre la filosofía de la ciencia contemporánea me obliga a aceptar el reto. Como hay incontables paradigmas en la física actual, me limitaré a presentar tres paradigmas vigentes que se entroncan en la magna obra de Albert Einstein durante la primera mitad del siglo XX.

### Cosmología

La cosmología física nació en 1917, pues hasta entonces la cosmología era parte de la filosofía. La teoría general de la relatividad de Einstein permitía describir el universo en su conjunto, algo imposible con la física newtoniana. En aquella época se pensaba que todo el universo estaba formado por nuestra galaxia, la Vía Láctea, siendo estático y eterno. Por desgracia, la teoría de Einstein predecía un universo dinámico con un origen en el tiempo; tenía que existir algo nuevo que lo evitara, que permitiera ajustar la teoría a las observaciones. Einstein introdujo la llamada constante cosmológica que antigravita y compensa la expansión cósmica. Pero en la década de los 1920 se descubrió la existencia de otras galaxias y que las más lejanas se alejaban de nosotros a una velocidad proporcional a su distancia. Así se desveló la ley de la expansión cósmica de Hubble-Lemaître, confirmando la predicción teórica de la cosmología relativista; la constante cosmológica pasó a ser contingente.

El universo estaba en expansión y tenía un origen en el tiempo. Siendo más pequeño en el pasado, tuvo que estar más caliente, así que su contenido sufrió diferentes transiciones de fase. La primera reconocida como tal fue la recombinación, que finalizó cuando el universo tenía unos trescientos mil años, la transición de fase de un plasma primordial opaco a la luz a un gas de átomos transparente a la luz. Durante la década de los 1940 se desveló la segunda transición de fase, la nucleosíntesis primordial, que finalizó cuando el universo tenía unos diez minutos; en ella se formaron los primeros núcleos atómicos a partir de un plasma primordial que contenía protones y neutrones libres. Así nació la teoría del big bang, cuyo nombre fue acuñado por Hoyle en 1949. Hasta finales de la década de los 1960 no se introdujo una tercera transición de fase, la bariogénesis, que dio lugar a la formación de los protones y neutrones a partir de un plasma de quarks y gluones. Profundizar en transiciones de fase más tempranas requiere especulaciones científicas; por ejemplo, todavía no hemos desvelado los detalles del mecanismo de asimetría entre la materia y la antimateria que dio lugar a un universo dominado por bariones, sin antibariones observables; sabemos que se requiere asimetría CP, pero el modelo estándar de la física de partículas no presenta la cantidad suficiente para explicar las observaciones.

**«El modelo cosmológico de consenso CDM nació con el siglo XXI y promete dominar la cosmología durante todo este siglo. Con solo seis parámetros permite describir todo el universo a gran escala; un impresionante poder predictivo para una teoría que está confirmada fuera de toda duda por todas las observaciones cosmológicas de precisión.»**

61

A finales de los 1970 la cosmología física se enfrentaba a gran número de problemas, siendo el más acuciante que el universo formado por materia bariónica era más joven que las estrellas más viejas. La inflación cósmica fue la solución necesaria; se abandonó la teoría del big bang caliente y se abrazó la del big bang inflacionario. Además, fue necesario asumir que el 80% de la materia del universo no es bariónica, sino que está formada por partículas aún no descubiertas, la llamada materia oscura. Aun así, la tasa de expansión cósmica estimada mediante observaciones cada vez más precisas sugería un universo más joven de lo aceptable; tratando de resolver este problema, a finales de la década de los 1990 se desveló que la expansión cósmica se estaba acelerando. Casi el 70% del universo estaba formado por una nueva sustancia llamada energía oscura, que aparentaba ser descrita por la constante cosmológica de Einstein.

El modelo cosmológico de consenso CDM nació con el siglo XXI y promete dominar la cosmología durante todo este siglo. Con solo seis parámetros permite describir todo el universo a gran escala; un impresionante poder predictivo para una teoría que está confirmada fuera de toda duda por

todas las observaciones cosmológicas de precisión. Sin embargo, ignoramos gran parte de la física que subyace a este modelo. Más de la mitad de la materia bariónica aún no ha sido observada, aunque creemos que se encuentra en la llamada web cósmica. Ignoramos la naturaleza microscópica de la materia oscura, que bien podría ser el hipotético axión predicho por la extensión más sencilla del modelo estándar, o bien podría ser una combinación de muchas otras partículas aún no descubiertas. También ignoramos la naturaleza microscópica de la energía oscura, quizás el mayor problema al que se enfrenta la cosmología física en el siglo XXI. Y, finalmente, ignoramos los detalles dinámicos de la inflación cósmica, que quizás estén relacionados con los otros problemas.

¿Cambiará el paradigma del modelo CDM durante el siglo XXI? Quién sabe, pero, en mi opinión, todo apunta a que este modelo tan joven sobrevivirá hasta el siglo XXI. ¿Seremos capaces de resolver en el siglo XXI todos los misterios que nos reserva la naturaleza microscópica de este modelo? No lo creo, pero intentarlo será apasionante. En las próximas décadas nos ayudarán mucho los telescopios espaciales especializados en observaciones cosmológicas; aprenderemos muchas cosas, pero quizás no sean suficientes.

## Física de partículas

A principios del siglo XX la existencia de los átomos era una especulación científica. Gracias al nacimiento de la radioactividad y a la explicación del movimiento browniano por parte de Einstein se desveló que existían los átomos fuera de toda duda. Un hecho que vino acompañado por la existencia de dos partículas aún más fundamentales que los átomos, el electrón y el fotón, este último gracias a los trabajos de Einstein. En la segunda década del siglo XX se confirmó que los átomos estaban formados por electrones y protones en sus núcleos, pues no fue hasta principios de la década de los 1930 cuando se desveló que también contenían neutrones. Esta década se abrió con el descubrimiento de la antimateria en los rayos cósmicos; el positrón, la antipartícula de electrón, fue la primera de muchas nuevas partículas que se fueron descubriendo hasta principios de los 1960. Solo entonces se empezó a comprender las leyes de la Naturaleza que rigen el comportamiento de las partículas fundamentales.

**«¿Cambiará el paradigma del modelo CDM durante el siglo XXI?... todo apunta a que este modelo tan joven sobrevivirá hasta el siglo XXI. ¿Seremos capaces de resolver en el siglo XXI todos los misterios que nos reserva la naturaleza microscópica de este modelo? No lo creo, pero intentarlo será apasionante.»**

El modelo estándar de la física de partículas nació en 1973 con solo dos generaciones de partículas; la tercera se predijo a finales de 1974 porque faltaba asimetría CP y se confirmó en 1977. Las partículas fundamentales se pueden clasificar en dos tipos, fermiones y bosones. Los fermiones del modelo estándar son de dos tipos, leptones y quarks. Hay leptones cargados, como el electrón y el muón, y leptones neutros, como los neutrinos. Y hay quarks de dos tipos según su carga eléctrica fraccionaria, tipo arriba y tipo abajo, aunque solo se pueden observar de forma indirecta, como parte de los hadrones (bariones y mesones), pues no existen como partículas libres. Los bosones también son dos tipos, vectoriales de espín uno y escalares de espín cero. Los bosones vectoriales están asociados a las tres interacciones gauge fundamentales observadas a baja energía, el electromagnetismo (QED), la interacción débil (EW) y la interacción fuerte (QCD). El fotón (bosón gauge QED), el cuanto electromagnético concebido por Einstein que le dio el Premio Nobel de Física, no tuvo una descripción teórica precisa hasta 1949. Los primeros indicios de la existencia de los bosones vectoriales débiles (bosones gauge EW) aparecieron en 1973, pero no se observaron hasta 1983. Los gluones (bosones gauge QCD) se observaron por primera vez, de forma indirecta, en 1977.

El modelo estándar exige la existencia de una cuarta interacción fundamental, responsable de la masa de todos los fermiones, llamada interacción de Yukawa; sin embargo, no es una interacción gauge mediada por un bosón vectorial, sino que está mediada por un bosón escalar descrito por el campo de Higgs. Esta interacción se observó de forma indirecta desde mediados de los 1980 tras la determinación de la masa de los bosones vectoriales débiles, pero la partícula asociada a este campo no fue descubierta hasta el siglo XXI.

**«¿Qué nos deparará el siglo XXI en física de partículas? Durante el siglo XX el motor de nuestro conocimiento han sido los descubrimientos inesperados de nuevas partículas, quizás siga siendo así durante este siglo. ¿Qué pasará si en el siglo XXI no se descubre ninguna nueva partícula?»**

64

Se ha afirmado muchas veces que, tras el anuncio del bosón de Higgs en 2012, el modelo estándar de la física de partículas está completado y que solo falta la medida de alta precisión de sus parámetros. En rigor no es cierto, pues hay muchos problemas internos del modelo estándar cuya solución más sencilla exige la existencia de nuevas partículas aún no observadas; como el axión QCD, un nuevo bosón escalar propuesto para explicar por qué no se ha medido aún el momento dipolar eléctrico del neutrón, o los monopolos magnéticos, predichos por las teorías gauge que describen las interacciones débil y fuerte, o incluso los neutrinos de quiralidad derecha, necesarios para explicar la masa de los neutrinos mediante el mecanismo de Higgs si son fermiones de Dirac como los

electrones. El siglo XXI se ha iniciado con una búsqueda intensa de estas nuevas partículas, cuya incorporación al modelo estándar será trivial, tanto que auguro que se seguirá llamando modelo estándar a la versión extendida que las incorpore.

La exploración intensa de la física fundamental debe continuar a bien ritmo durante todo el siglo XXI. El modelo estándar de la física de partículas aún no ha cumplido cincuenta años, pero necesita ser extendido para explicar todas las observaciones. Problemas como la naturaleza microscópica de la materia oscura, la dinámica de la inflación cósmica, el problema de la estabilidad del universo debido a la baja masa del bosón de Higgs, entre otros muchos, exigen ir más allá del modelo estándar. Se han propuesto muchas extensiones del modelo estándar, pero la más sencilla es la incorporación de una nueva simetría, la supersimetría a baja energía. Esta idea tiene muchos detractores, pues predice cientos de nuevas partículas aún por descubrir, y tras una búsqueda muy intensa desde principios de los 1990, aún no ha sido observada ni siquiera de forma indirecta. La belleza de las teorías supersimétricas, fuera de toda duda, sugiere su existencia a alta energía, donde puede resolver los problemas asociados a los primeros instantes del *big bang* inflacionario; pero su papel en la solución de los problemas que observamos a baja energía no está claro. Por ello hay otras soluciones más ajustadas a las observaciones a baja energía que podrían protagonizar un cambio de paradigma desde el modelo estándar hacia un nuevo modelo estándar extendido.

¿Qué nos deparará el siglo XXI en física de partículas? Durante el siglo XX el motor de nuestro conocimiento han sido los descubrimientos inesperados de nuevas partículas, quizás siga siendo así durante este siglo. ¿Qué pasará si en el siglo XXI no se descubre ninguna nueva partícula? La física newtoniana nació a mediados del siglo XVII y se mantuvo firme hasta principios del siglo XX; quizás el joven modelo estándar se mantenga firme durante varios siglos. Lo que está claro es que hay multitud de misterios en física fundamental que tenemos que resolver. En las próximas décadas necesitamos la construcción de nuevos colisionadores, tanto los que busquen partículas a escalas de energía más altas, como los que exploren con mayor precisión la física de las partículas ya conocidas. Además, necesitamos jóvenes físicos teóricos que ofrezcan nuevas ideas que nos guíen hacia los secretos de la Naturaleza. Quizás necesitemos varios siglos, pero la humanidad encontrará las respuestas que aún nos acucian.

65

## Teoría de todo

La gran obra de Einstein queda ensombrecida por su desesperada e infructuosa búsqueda de una teoría unificada final, una teoría de todo. Muchos físicos aspiran a que esta futura teoría explique todo el contenido del universo, descrito por el modelo estándar y sus extensiones, si son necesarias, así como todo su continente, la naturaleza microscópica del espaciotiempo y las modificaciones de la gravitación, si son necesarias.

El siglo XX nos brindó dos de las teorías más bellas de toda la física, la teoría de la relatividad general que describe la gravitación y la teoría cuántica de campos que describe las otras cuatro interacciones fundamentales.

**«La búsqueda intensa de una teoría de todo de inició a finales del siglo xx y se ha encontrado con dos grandes problemas. Por un lado, ignoramos el lenguaje matemático adecuado para describirla; se han propuesto varias extensiones sencillas de los usados en la física de partículas y en la gravitación, pero todo indica que se necesita un nuevo lenguaje matemático aún por descubrir.»**

Además nos brindó una conexión íntima entre ambas a muy alta energía. En la escala de energía de Planck (mil billones de veces superior a la que explora el LHC del CERN las partículas se transforman de forma espontánea en agujeros negros microscópicos y dichos agujeros negros se evaporan en chorros de partículas. La misma naturaleza del espacio-tiempo se diluye en una especie de espuma cuántica, impidiendo usar la noción de partícula localizada en el espaciotiempo. Esta unión íntima entre la gravitación y el resto de las interacciones fundamentales es especulativa, aunque es la luz que nos guía en la búsqueda de una teoría cuántica de la gravitación como nuevo paradigma.

67

La búsqueda intensa de una teoría de todo de inició a finales del siglo XX y se ha encontrado con dos grandes problemas. Por un lado, ignoramos el lenguaje matemático adecuado para describirla; se han propuesto varias extensiones sencillas de los usados en la física de partículas y en la gravitación, pero todo indica que se necesita un nuevo lenguaje matemático aún por descubrir. Y, por otro lado, siendo una teoría que describe el universo a la mayor escala de energía concebible, la escala de Planck, tan alejada de las escalas de energía que podemos explorar en nuestros experimentos, las propuestas actuales son incapaces de realizar predicciones generales a muy baja energía.

Mientras no tengamos indicios observacionales que nos guíen, nuestro único adalid será la belleza de la formulación matemática de la teoría; por desgracia, el pasado demuestra que la belleza per se nos puede conducir a caminos erróneos. ¿Se vislumbra la teoría de todo en el siglo XXI? Muchos lo deseamos, pero la realidad apunta a que faltan siglos. Aún así, ahora mismo debemos disfrutar de los jóvenes paradigmas de la Física que hemos heredado del siglo XX. —